

## **GESTION DE L'EAU ET DE LA SALINITE ET REDISTRIBUTION DES SELS DANS LES PERIMETRES IRRIGUES**

### **WATER AND SALINITY MANAGEMENT AND SALT REDISTRIBUTION IN IRRIGATION SYSTEMS**

S. Marlet<sup>1</sup> B. Vincent<sup>2</sup> A. Vidal<sup>2</sup> S. Bouarfa<sup>2</sup>  
J. Wu<sup>3</sup> J. Yang<sup>3</sup> M.K. N'Diaye<sup>4</sup> M. Kuper<sup>1</sup> D. Zimmer<sup>5</sup>

#### **RESUME**

La salinité des sols est présente dans la plupart des grands systèmes d'irrigation à travers le monde sous l'effet conjugué d'une mauvaise qualité des eaux d'irrigation, de l'aridité et d'un drainage insuffisant du sol et des aquifères. Les tendances évolutives dans la gestion de l'eau et la salinité des sols sont évaluées à travers différents travaux réalisés en Chine, au Mali, en Ouzbékistan et au Pakistan. La salinisation apparaît comme la conséquence de divers processus complexes de redistribution des sels liés au fonctionnement hydrologique du milieu sous l'influence de l'irrigation et du drainage. Ces évolutions résultent de modifications induites par la gestion agricole de l'eau dans différents contextes liés à un drainage insuffisant, à une utilisation accrue d'eaux souterraines ou de drainage de mauvaise qualité en situation de pénurie, ou encore au rejet des eaux de drainage en aval des aménagements.

La gestion de la salinité nécessite une méthode appropriée permettant à la fois de comprendre les processus impliqués et d'évaluer les décisions à adopter en matière de gestion et de planification en fonction de la situation actuelle et des évolutions attendues. La distribution spatiale de la salinité peut être caractérisée à des dates spécifiques par télédétection aux petites échelles et par cartographie des sols au plus grandes échelles. Des données

---

<sup>1</sup> Cirad, UMR Gestion de l'Eau, Acteurs et Usages, TA 40/01, 34398 Montpellier cedex 5, France - Tel : +33 4 67 61 65 98 - serge.marlet@cirad.fr

<sup>2</sup> Cemagref, UMR Gestion de l'Eau, Acteurs et Usages, France

<sup>3</sup> Université de Wuhan, Chine

<sup>4</sup> Office du Niger, Mali

<sup>5</sup> World Water Council, France

supplémentaires sont généralement nécessaires pour une analyse pertinente de l'origine de cette répartition. Dans une première étape, les tendances évolutives peuvent être évaluées par une estimation des bilans en eau et en sels aux différentes échelles de l'aménagement. La dernière étape consiste à mettre en œuvre un dispositif pérenne complémentaire pour l'analyse des performances des usagers et gestionnaires de l'eau, et un suivi de la nappe et des sols. Un tel dispositif permet alors d'envisager le développement de nouveaux outils d'aide à la décision et méthodes d'accompagnement des évolutions.

## **SUMMARY AND CONCLUSIONS**

Soil salinity is present in most of the large irrigation schemes over the world under the conjunctive effect of low quality irrigation water, aridity and lack of natural drainage of soils and aquifers. The trends in water management and soil salinity are assessed through studies in China, Mali, Pakistan and Uzbekistan.

In China, the upper valley of the yellow river (Huinong irrigation district) is characterized by aridity, good water availability and over-irrigation. Despite large amount of drainage water returning to the river, excess in water supplied a resulted in shallow water table, accumulated in depression and in soil salinity. Remote sensing showed that downstream areas are more affected by salinity and displayed lower cropping intensity. The lower valley (Bojili Irrigation District) is faced with shortage of irrigation water. Drainage water of low quality is re-used to assist leaching thereby, cheating salinity hazard.

In Mali (Office du Niger), the soils are affected by an alkalinization process due to irrigation water quality. A previous reclamation of irrigation and drainage systems has modified agricultural practices and water management, that also altered the trend of soil alkalinity. The improvement of surface drainage of flooded rice cropping season has decreased soil pH in clayey basins. Concomitantly the improvement of irrigation has allowed cropping during the dry season. Nowadays, water stands in irrigation canal all the year long and creates a shallow water table. The recharge is high on permeable material and soil pH increases on sandy levees.

In Pakistan (Chistian sub-division) shortage of irrigation surface water has lead to a significant increase in conjunctive use of groundwater of low quality. Consequently, the water table and soil salinity decreased while soil sodicity increased even though, leaching is improved. Whereas, farmers got used to control salinity, the sodification hazard is more difficult to grasp and manage. To assess the extension of soil degradation, remote sensing can only provide accurate information through assimilation of additional information.

In Uzbekistan (Fargana valley), a deep drainage system has been set up in order to reduce waterlogging and control soil salinity. The discharge of salt by drainage is more than twice the salt amount provided by irrigation due to the mobilization of primary aquifer salinity. This operation is technically

successful but, environmentally dreadful. Too much water is diverted from Syr-Daria and Amou-Daria rivers and Aral Sea declined dramatically. The salinity of downstream plains increased.

Salinization is the consequence of various complex processes of salt redistribution which depends on natural conditions, system features, agricultural practices and irrigation and drainage management. These evolutions result from alterations induced by agricultural water management within contexts of limited drainage, increasing conjunctive use of low quality drainage or groundwater, or the release of drainage water downstream.

Salinity management requires an appropriate methodology to understand the involved process and to assess decisions for management and planning according to the current and expected impact on the system. Spatial distribution of salt can be characterized for specific dates through remote sensing at small scales and soil survey at higher scales. It requires additional information for pertinent analysis of the origin of this distribution. In the first stage, trends can be assessed by the estimation of water and salt balance at various scales within the irrigated area. Later stage consists of implementation of a perennial complementary device including groundwater and soil monitoring, and also the analysis of agricultural water management for the assessment of both performances and sustainability of irrigation. It allows further development of decision-making tools and accompanying methods for the control of salinity.

## INTRODUCTION

Les superficies irriguées ont connu un accroissement très rapide depuis 1950 et, malgré un ralentissement observé depuis 1980, elles atteignent aujourd'hui près de 300 millions d'hectares. Les évaluations indiquent que, selon les situations, de 15 à 50% des terres aménagées et environ 50% des systèmes d'irrigation seraient affectés par la salinité, plus particulièrement dans les zones arides (Rhoades, J.D. 1997). En raison investissements réalisés et de ressources en eau limitées, la priorité doit aujourd'hui être accordée à la durabilité des systèmes existants, à l'accroissement de la productivité de l'eau et à la reconquête des terres affectées voire abandonnées.

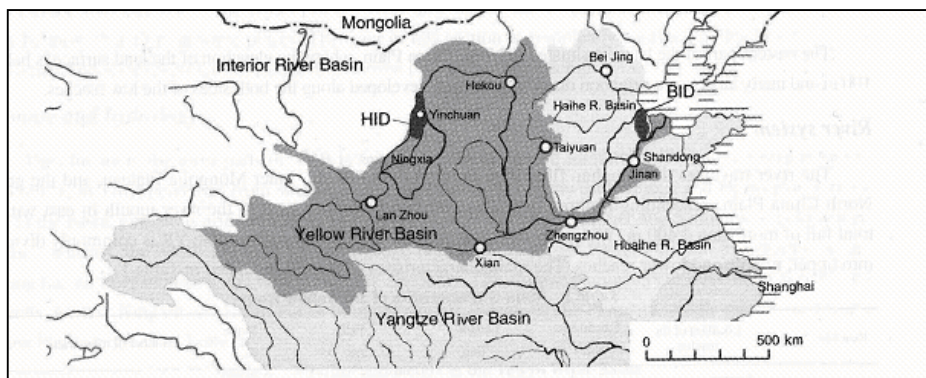
Au-delà des risques spécifiques liés à la qualité des eaux d'irrigation (Gupta, I.C. 2000), ces mécanismes de salinisation sont la résultante du fonctionnement hydrologique du milieu et de mécanismes de concentration des sels apportés par l'irrigation, ou présents dans les aquifères. La répartition des sels qui en découle n'est pas homogène en raison d'interactions complexes entre les propriétés variables des sols et des aquifères, et de l'existence de modalités et performances variables de la gestion de l'irrigation et du drainage aux différentes échelles dans les périmètres irrigués. Ces évolutions ne sont pas linéaires et sont soumises à d'incessantes modifications et adaptations dans la gestion hydraulique et agronomique des périmètres irrigués (Marlet, S. 2004).

Dans cet article, différents aspects de la redistribution des sels dans le milieu sous l'influence de l'irrigation et du drainage seront tout d'abord présentés à partir de situations contrastées en Chine, au Mali, en Ouzbékistan et au Pakistan. Les principaux déterminants de ces évolutions et des structures spatiales qui en résultent, de même que les méthodes d'étude de ces évolutions seront ensuite discutées.

## ETUDE DE CAS

### Périmètres irrigués du Fleuve Jaune (Chine)

Le fleuve jaune est le deuxième cours d'eau de Chine. Traversant 9 provinces et fournissant annuellement 58 milliards de m<sup>3</sup> à 130 millions d'individus, il délivre une ressource finalement assez rare d'un peu moins de 500 m<sup>3</sup> par habitant. Cette pénurie affecte principalement la partie aval de la vallée qui bénéficie en retour d'un contexte climatique plus favorable de mousson (540 mm de précipitations annuelles). En amont le climat est aride (190 mm de précipitations annuelles) mais la ressource en eau est abondante. Dans le cadre du projet Yellowatsave<sup>6</sup>, deux districts d'irrigation ont été choisis (Cai, L.G. et al. 2003), respectivement en amont, Huinong Irrigation District<sup>7</sup> (HID), et en aval, Bojili Irrigation District<sup>8</sup> (BID), de la vallée (Figure 1).



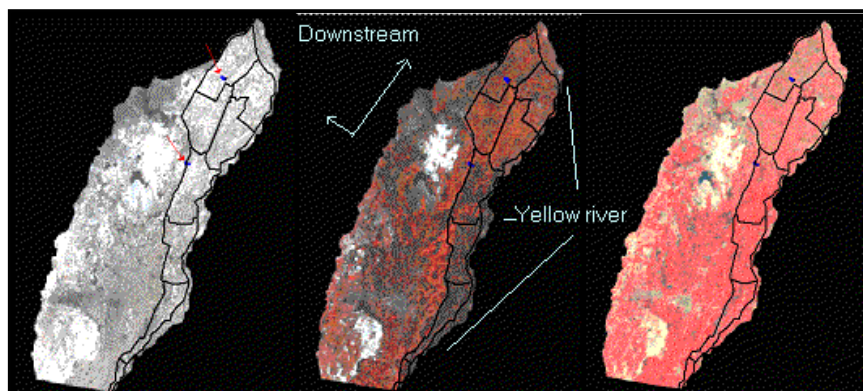
**Figure 1.** Bassin du fleuve Jaune et districts d'irrigation de Huinong (HID, province de Ningxia) et de Bojili (BID, province de Shandong) en Chine (Yellow river watershed and Huinong (HID, Ningxia province) and Bojili (BID, Shandong province) Irrigation District in China).

<sup>6</sup> "Policies for Water Savings in the Yellow River Basin: A DSS Applied to Ningxia and Shandong" <sup>6</sup> INCO-DC Project n° ERBIC18CT970170

<sup>7</sup> HID : 100000 hectares dans la province de Ningxia, au sein du périmètre irrigué de Qingtongxia (400000 hectares irrigués)

<sup>8</sup> BID : 100000 hectares dans la province de Shandong, au sein des vastes plaines alluviales

Malgré une faible disponibilité en eau et la réutilisation des eaux de drainage salées (2 g/l en moyenne et jusqu'à 4 g/l) et diluées par des eaux fraîches stockées en surface, le système du BID apparaît performant et durable (Bouarfa, S. et al. 2003; Minhas, P.S. et al. 2003). La salinité ne s'exprime pas dans le domaine cultivé et n'apparaît qu'en raison d'intrusions marines à l'aval où se trouvent des fermes aquacoles et des salines.



**Figure 2.** Périmètre irrigué de Qingtongxia (province de Ninxia) : composition colorée de scène Landsat 7 (Proche infra rouge, rouge, vert) en avril (gauche), en juin (centre), et en septembre (droite) 1999. En blanc les croûtes de sel. Limites des divisions du Huinong Irrigation District (HID). (Ningxia province, Qingtongxia irrigated scheme, Landsat 7 color composition (Near Infra Red, Red, Green) in april (left), june (center) and septembre (right) 1999. Salt crusts in white. Limits of divisions of the Huinong Irrigation Districts (HID)).

A Ninxia, le climat est aride avec 5 mois d'hiver très froid ; les cultures sont principalement le blé, le maïs et le riz. Dans le Qingtongxia system, environ 14000 m<sup>3</sup>/ha sont distribués, soit 2 à 3 fois les besoins des cultures (Mao, Z. et al. 2003), et 6200 m<sup>3</sup>/ha sont restitués au fleuve Jaune par le réseau de drainage. Environ 15% d'eau excédentaire alimentent la nappe ou s'accumulent dans des dépressions conduisant à des problèmes d'engorgement et de salinité, plus sensibles à l'aval qu'à l'amont (Hollanders, P.H.J. et al. 2003 ; Wang, X. et al. 2004). L'utilisation d'images satellitaires d'Avril, Juin et Septembre 1999 (Fig. 2) traitées en indice de brillance IB et indice de végétation normalisé (NDVI) montrent que (Vincent, B. 2003):

- Les croûtes de sels sont détectées aux trois dates avec un maximum en Avril (96000 ha soit 25% de la superficie du périmètre), un minimum en juin (19000 ha) et 25000 ha en septembre, dont 6000 ha nouvellement apparus et tous localisés en aval (division 8 de HID). Une partie de ces croûtes de sels est commune aux trois dates et peut être considérée comme permanente ;
- Les croûtes temporaires deviennent soit du sol nu (68000 ha en juin et 14000 ha en septembre) soit du sol cultivé qui montre en septembre des valeurs faibles du NDVI ;

- En l'absence de croûtes de sel, les faibles valeurs du NDVI (environ 195000 ha) sont majoritairement situées vers l'aval dont les potentialités agronomiques apparaissent limitées. Ces observations corroborent les résultats du modèle du fonctionnement du drainage mettant en évidence des risques élevés de salinisation (Hollanders, P.H.J. et al. 2003).

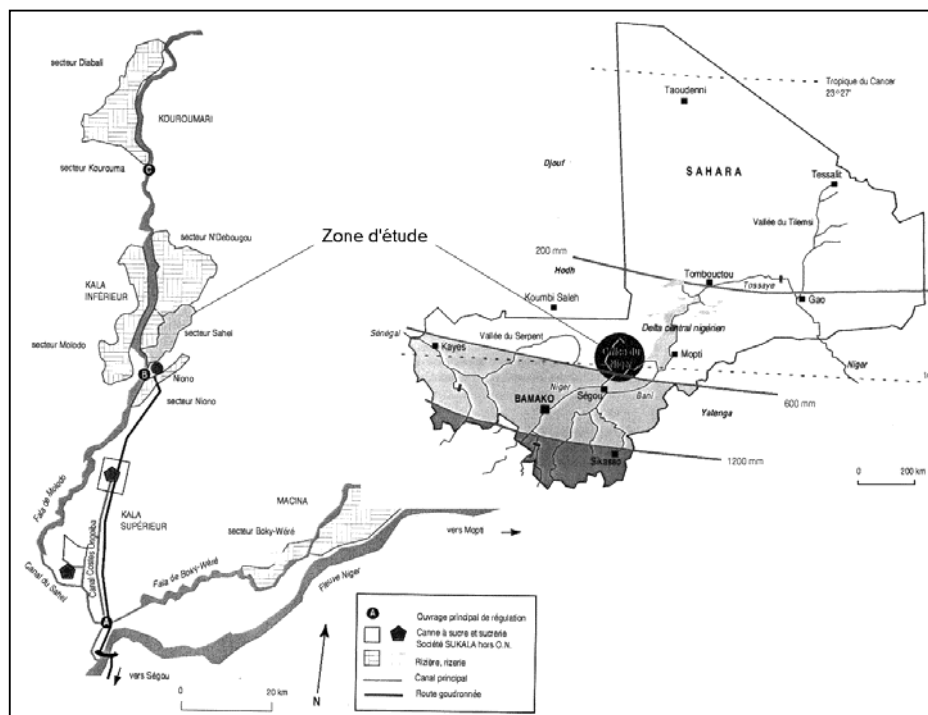
L'utilisation de la télédétection permet de mettre en évidence l'existence d'un gradient de salinité croissant, mais aussi une augmentation de l'occurrence des parcelles présentant de faibles valeurs du NDVI, de l'amont vers l'aval. A plus grande échelle, les motifs apparents dans les secteurs affectés par la salinité pourraient être liés à certains facteurs de risques : dépressions naturelles, inondation, niveau de la nappe en relation avec la fonctionnalité du réseau de drainage ou la proximité d'un canal d'irrigation, ... (Hollanders, P.H.J. et al. 2003). Les scénarios envisagés recommandent de diminuer l'allocation d'eau, sous l'hypothèse d'une distribution équitable de l'eau entre l'amont et l'aval du périmètre. La Commission du Fleuve Jaune a appliqué ces diminutions d'allocations, mais il n'est pas certain que les dispositions aient été prises pour que la distribution soit équitable. Le suivi des superficies affectées par les croûtes de sel et l'évolution de la NDVI pourrait constituer un indicateur de performance et de durabilité, relativement peu coûteux.

### **L'office du Niger (Mali)**

La mise en valeur des périmètres irrigués de l'Office du Niger a débuté en 1947 avec l'achèvement du barrage de Markala (Figure 3). Initialement présente vers 45 mètres de profondeur, la nappe est devenue sub-affleurante en une vingtaine d'années. Les aménagements gravitaires ont progressivement évolués vers une monoculture de riz pendant la saison pluvieuse. Très peu salées, les eaux du fleuve Niger sont caractérisées par une alcalinité résiduelle positive et des phénomènes d'alcalinisation ont été formellement identifiés à partir de 1980 sous la forme d'une augmentation sensible du pH des sols (Bertrand, R. et al. 1992; Marlet, S. and M.K. N'Diaye 2002). Les aménagements du secteur Sahel ont été réhabilité à la fin des années 80 et ont favorisé l'amélioration de l'irrigation et du drainage ; la forte intensification de la riziculture dont les rendements sont passés de 2 à plus de 5 t/ha ; et le développement des cultures de contre-saison sur des superficies cependant limitées.

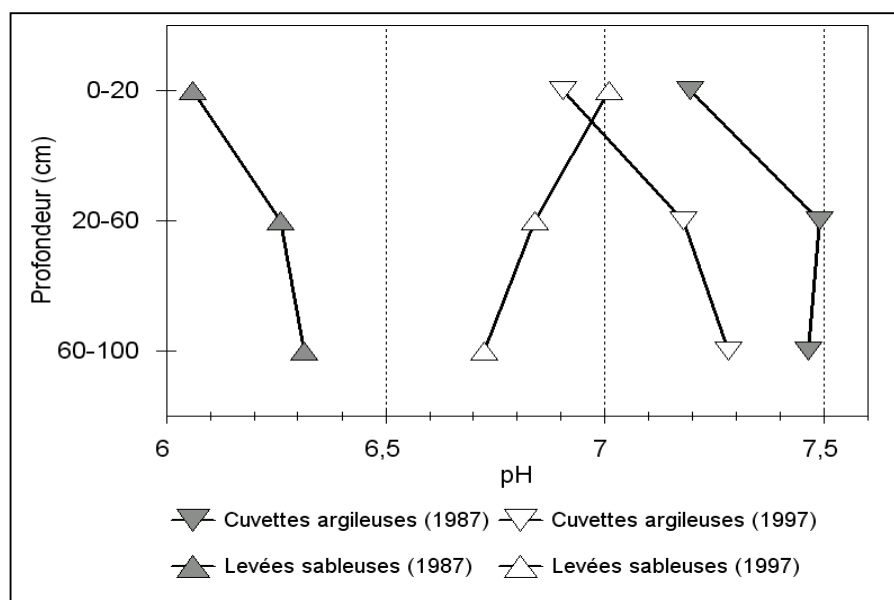
Ces innovations dans la gestion du système ont sensiblement infléchi l'évolution des propriétés chimiques des sols sous irrigation (Marlet, S. and M.K. N'Diaye 2002 ; N'Diaye, M.K. et al. 2003). Dans la période précédant la réhabilitation des périmètres, la maîtrise de l'irrigation et du drainage était déficiente. Le pH des sols argileux peu perméables et situés dans des cuvettes mal drainées a augmenté. Les sols situés sur des levées sableuses semblent avoir été plus efficacement lessivés et drainés. Dans la période suivant la réhabilitation des périmètres, le pH des sols sableux a rapidement augmenté tandis qu'il diminuait sur les sols argileux. Ces évolutions sont particulièrement sensibles dans l'horizon superficiel tandis que les propriétés des horizons profonds restent partiellement héritées des évolutions

antérieures (Figure 4). La topographie joue un rôle déterminant dans la distribution des sels et du pH, les points hauts apparaissant comme les plus sensibles à la dégradation.

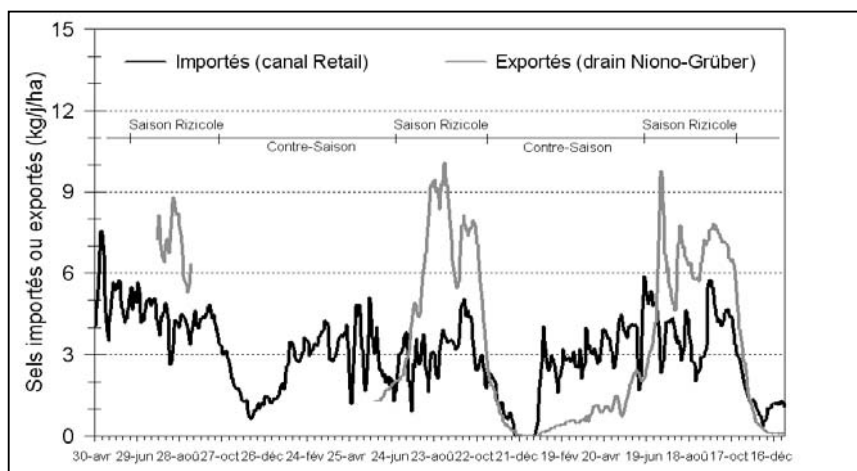


**Figure 3.** Localisation des périmètres irrigués de l'Office du Niger et de la zone d'étude du secteur Sahel ou Retail (Location of the Office du Niger irrigated schemes and the study area in secteur Sahel or Retail)

Le suivi du fonctionnement aux différentes échelles, de la parcelle au périmètre, permet d'analyser les processus qui conditionnent ces évolutions. A l'échelle du réseau secondaire (distributeur) pendant la saison rizicole, 14500 m<sup>3</sup>/ha d'eau d'irrigation et 430 mm de pluie alimentent les cultures et le réseau de drainage qui évacue 6900 m<sup>3</sup>/ha dans les terres situées à l'aval des périmètres irrigués. Le bilan des sels est négatif en raison d'importantes sorties de sels par le système de drainage, dont 73% sont issus de la vidange (flushing) des bassins rizicoles (N'Diaye, M.K., S. Marlet and M. Dicko 2003). La submersion et l'alternance de périodes de réduction et d'oxydation des sols contribuent à la mobilisation de l'alcalinité (Dicko, M. et al. 2002). Le bilan des sels est positif pendant la contre-saison en raison d'une alimentation continue de la nappe liée à la mise en eau des canaux d'irrigation, notamment sur les formations les plus perméables (Figure 5).



**Figure 4.** Evolution du pH moyen des sols argileux et des sols sableux depuis la réhabilitation de l'irrigation et du drainage dans le secteur Sahel : 1987 à 1997 (Trend of soil pH in clayey soils and sandy soils from reclamation of irrigation and drainage in secteur Sahel : 1987 to 1997).



**Figure 5.** Quantités journalières de sels importées par le réseau d'irrigation : distributeur Retail pour 4275 hectares, et exportées par le système de drainage : Drain principal Niono-Grüber pour 4200 hectares (Daily amount of salts imported by irrigation : Retail tributary for 4275 hectares, and exported by drainage : Niono-Grüber drain for 4200 hectares).



Dans un contexte général où le bilan des sels apparaît globalement proche de l'équilibre, l'évolution des sols est marquée par une forte redistribution des sels des cuvettes argileuses vers les levées sableuses. Le pH peut y atteindre localement des valeurs supérieures à 9 dans les zones où la maîtrise de la lame d'eau est déficiente. Ces évolutions sont liées à une modification radicale du fonctionnement hydrologique sous l'influence conjointe d'une amélioration du drainage et d'une recharge accrue de la nappe sur les formations les plus perméables.

### La vallée de la Fergana (Ouzbékistan)

L'agriculture dans le bassin versant de la Mer d'Aral est entièrement tributaire de l'irrigation. Les deux principaux fleuves, le Syr-Daria et l'Amou-Daria, constituent les deux principales ressources en eau (Figure 6). Les périmètres irrigués de la région se sont développés dès la fin des années 30 pour atteindre plus de 7 millions d'ha à l'heure actuelle. La consommation annuelle correspondante est d'environ 105 km<sup>3</sup> (60 pour l'Amou-Daria et 45 pour le Syr-Daria), soit environ 15000 m<sup>3</sup>/ha. La culture quasi exclusive a été longtemps le coton qui représente encore une large part de la production avec le blé. L'opinion publique mondiale a depuis longtemps été alertée sur les conséquences dramatiques du détournement de l'eau des fleuves sur la réduction de la Mer d'Aral qui constitue leur exutoire naturel. Cette réduction a été chiffrée à environ 14 mètres entre 1960 et 1990, soit 40 % de sa superficie et 60 % de son volume, et le phénomène ne cesse de s'amplifier. Il serait nécessaire de restituer un minimum de 30 km<sup>3</sup> par an à la Mer d'Aral pour la stabiliser à son niveau actuel. Une importante hausse de la salinité a également été constatée dans les plaines situées à l'aval des grands réseaux d'irrigation.



**Figure 6.** Carte de situation de la vallée de la Fergana, Ouzbékistan.  
(Location of the Fergana valley, Uzbekistan)

Parallèlement au développement de l'irrigation, un vaste programme de drainage a été mis en place par les anciennes républiques soviétiques pour abaisser le niveau de salinité primaire sur 5,5 millions d'ha. Ce vaste réseau est principalement constitué de drains enterrés sur 4,75 millions d'ha et de

drainage vertical sur 0,75 millions d'ha (Dukhovny et al., 2002). Le réseau de drainage souterrain a été conçu pour rabattre au maximum une nappe devenue superficielle suite à la mise en eau du système, et limiter les flux de remontées capillaires et les phénomènes de concentration. En conséquence l'option choisie a été d'enterrer les tuyaux de drainage à la plus grande profondeur techniquement possible, soit à 3,5 m en moyenne avec des écartements compris entre 100 et 400 m. Malgré le succès apparent de ces opérations de drainage et la diminution très significative de la salinité des trois premiers mètres de sol, des questions demeurent sur les conséquences environnementales de l'extraction des sels à une telle échelle et sur une telle profondeur de sol.

Les suivis expérimentaux réalisés dans la vallée de la Fergana dans le cadre d'un projet européen CIRMAN Aral<sup>9</sup> ont mis en évidence les conséquences des options de drainage sur le bilan de salinité. La vallée de la Fergana suit le cours du Fleuve Syr Daria qui constitue à la fois la source de l'eau d'irrigation et l'exutoire principal des eaux de drainage. Des bilans salins ont été réalisés au sein d'une ferme expérimentale d'une superficie totale de 160 ha, et occupée par 16 parcelles cultivées en coton et blé selon la rotation biannuelle pratiquée dans la région. L'irrigation à la raie y est pratiquée sur des longueurs de 400 m en moyenne comme dans l'ensemble de la région et le drainage y a été installé en 1960 à une profondeur comprise entre 3,5 et 3,7 m. Les bilans salins réalisés 40 années après l'installation du drainage témoignent d'un déséquilibre entre les entrées et les sorties de sels (Figure 7). Tandis que le drainage exporte respectivement 9,5 et 8,1 t/ha/an en moyenne sur l'ensemble des 160 ha au cours des deux années de mesure (2001-2002 et 2002-2003), les importations en sels par l'eau d'irrigation sont de respectivement 3,7 et 3,2 t/ha/an seulement. 60% des sels drainés proviennent d'une salinité primaire de l'aquifère.

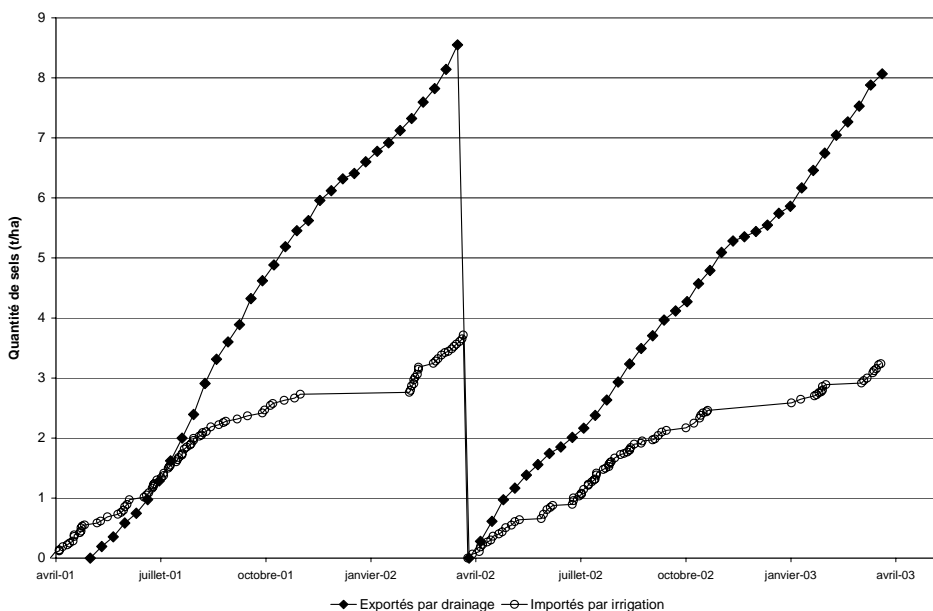
Au niveau hydraulique, ce phénomène s'explique par la capacité du système de drainage enterré à générer des flux souterrains plus profondément que sa propre profondeur de pose (ILRI, 1994, Zimmer et Bouarfa, 1998). Il est complété par la probable migration ascendante des sels sous le double effet d'une pression artésienne présente sur l'ensemble de la vallée d'une part, et du gradient vertical de concentration de salinité d'autre part. Cette salinité est rejetée à l'aval du bassin via le réseau hydrographique avec de sévères conséquences environnementales. Cette situation milite en faveur d'une approche intégrée des opérations d'irrigation et de drainage, et de l'évaluation de leurs performances. Prise à l'échelle parcellaire, on peut considérer cette opération comme un succès. A l'échelle du bassin de la Mer d'Aral, c'est un dramatique échec environnemental.

### **La plaine de l'Indus au Pakistan (périmètre de Fordwah)**

La plaine de l'Indus constitue le plus grand périmètre irrigué du monde. 128 milliards de m<sup>3</sup> sont dérivés de l'Indus et de ses affluents pour l'irrigation de 16 millions d'ha irrigués, soit 8000 m<sup>3</sup>/ha en moyenne dans un contexte de

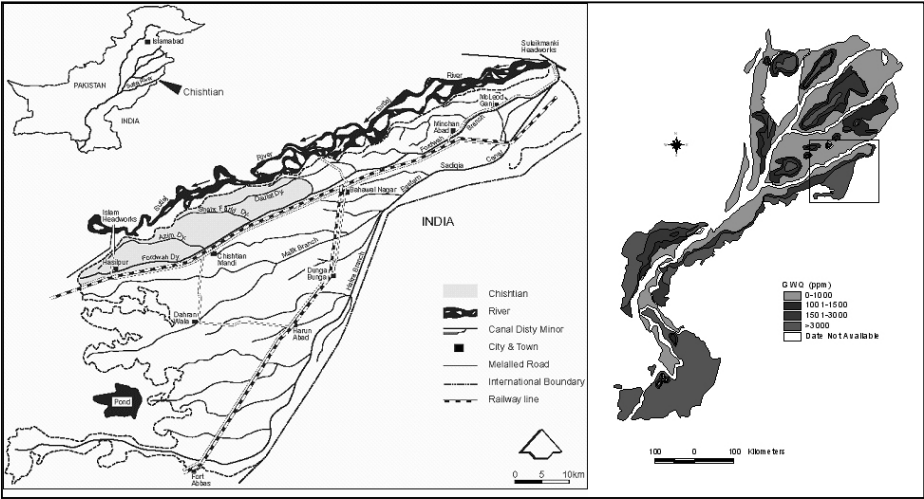
---

<sup>9</sup> Crop Irrigation Management for combating irrigation induced desertification in the Aral sea basin (ICA2-CT-2000-10039)

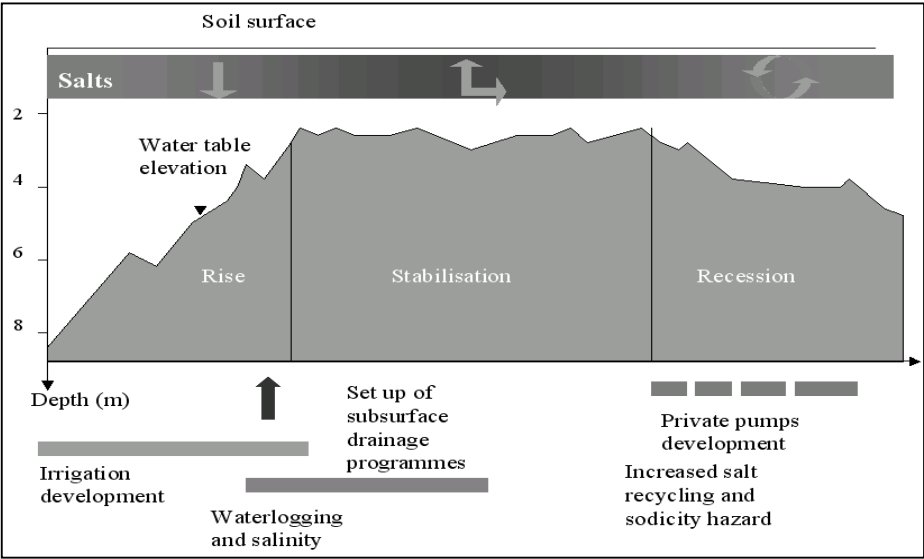


**Figure 7.** Quantité cumulée de sels exportés par drainage souterrain et importés par irrigation à l'échelle d'une ferme expérimentale de 160 ha au cours de deux années de suivi (Cumulative amount of salts exported by groundwater drainage and imported by irrigation at the scale of an experimental farm of 160 ha for 2 years)

grande hétérogénéité entre les canaux d'irrigation. Pour le seul Punjab pakistanais (10 millions d'ha irrigués), on considère qu'entre 0,6 et 4 millions d'ha sont affectés par des problèmes de salinisation. La subdivision de Chistian du périmètre de Fordwah couvre 69 000 ha (Figure 8). L'absence de drainage souterrain et la remontée de la nappe ont conduit les autorités locales à conduire dans les années 70 d'importants programmes de drainage vertical par pompage (SCARP I et II) qui ont eu pour premier effet d'abaisser la nappe et de réduire la salinisation des sols. Dans un deuxième temps, les agriculteurs ont privilégié la mise en place de nombreux forages superficiels de capacité plus modeste pour une irrigation plus flexible. De l'amont vers l'aval du système hydraulique, on y observe conjointement une diminution de la disponibilité en eau de surface et une dégradation de la qualité des eaux souterraines. Elles se conjuguent avec la variabilité des sols et une certaine iniquité entre les canaux tertiaires pour induire une grande diversité de situations auxquelles les agriculteurs sont confrontés (Kuper, M. and Z. Habib 2002). Ces tendances évolutives : remontée, stabilisation, puis récession de la nappe, sont représentatives de la situation de nombre de grands systèmes d'irrigation à travers la monde (Zimmer, D. 2003) (Figure 9).

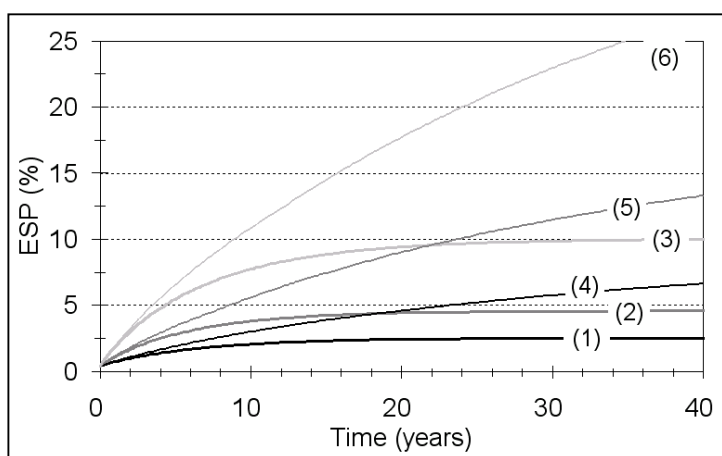


**Figure 8.** Localisation des zones irriguées et de la zone d'étude, Chistian sub-division, et variabilité spatiale de la qualité des eaux souterraines à l'échelle de la vallée de l'Indus au Pakistan (Location of the irrigated areas and study area, Chistian subdivision, and spatial variability of groundwater quality at the scale of the Indus valley in Pakistan)



**Figure 9.** Des évolutions conjointes des contraintes hydriques, de la nappe et de la salinité similaires dans de nombreux périmètres irrigués, (d'après Zimmer, 2003) (Joint trend of hydric constraints, water table and salinity in numerous irrigated schemes (from Zimmer, 2003))

La plaine de l'Indus s'est formée à partir de sédiments marins déposés dans une mer peu profonde. L'orogénèse himalayenne et le recul de la mer ont laissé d'importantes quantités de sels et de minéraux dans les aquifères (Ghassemi, F. et al. 1995). Ces matériaux ont ensuite évolué sous l'effet du lessivage progressif par les eaux de surface de bonne qualité issue de l'Himalaya et des mécanismes géochimiques qui lui sont associés. La qualité des eaux souterraines qui en résulte est souvent caractérisée par un Sodium Adsorption Ratio (SAR) élevé et une valeur positive du Residual Sodium Carbonate (RSC). A titre d'exemple, l'influence de différentes qualités d'eau d'irrigation et fraction de lessivage a été simulée (Figure 10). Alors que la salinisation des sols est principalement liée à la quantité de sels et à la fraction de lessivage, l'évolution de la sodicité est fortement dépendante de la nature des eaux utilisées (Marlet, S. 1997). L'utilisation conjuguée des eaux de surface et souterraine pour l'irrigation s'accompagne d'un risque accru de sodisation des sols (Condom, N. et al. 1999).



**Figure 10.** Evolution du taux de sodium échangeable (ESP) en fonction de deux hypothèses de fraction de lessivage : moyenne=10% (simulation 1,2 et 3) ou faible=1% (simulation 4, 5 et 6), et de trois qualités d'eau d'irrigation : eau de canal (simulation 1 et 4) avec  $CE=0.19$  dS/m,  $SAR=0.2$  et  $RSC=-0.59$  mol/l, ou eau de canal mélangée à 10% d'eau souterraine : Forage n°1 (Simulation 2 et 5) avec  $CE=0.82$  dS/m,  $SAR=1.5$  et  $RSC=-3.00$  mol/l ; et Forage n°2 (Simulation 3 et 6) avec  $CE=0.84$  dS/m,  $SAR=7.7$  et  $RSC=+2.70$  mol/l (Evolution of Exchangeable Sodium Percentage (ESP) according to two assumptions of leaching fraction : median=10% (simulation 1, 2 and 3) or low=1% (simulation 4, 5 and 6), and three irrigation water qualities : Canal water (simulation 1 and 4) with  $EC=0.19$  dS/m,  $SAR=0.2$  and  $RSC=-0.59$  mol/l, or a mix of canal water with 10% of groundwater : Tubewell n°1 (simulation 2 and 5) with  $EC=0.82$  dS/m,  $SAR=1.5$  et  $RSC=-3.00$  mol/l ; and Tubewell n°2 (simulation 3 and 6) with  $EC=0.84$  dS/m,  $SAR=7.7$  et  $RSC=+2.70$  mol/l)

Si la salinité initiale liée à la remontée de la nappe était bien identifiée par les agriculteurs et relativement maîtrisée par un ensemble de pratiques relevant de la gestion de l'eau (lessivage), du choix des assolements (riziculture, cultures tolérantes) et des travaux agricoles (labour et nivellement), la sodicité secondaire est en revanche plus difficilement perceptible et contrôlable. En l'absence de cartographie précise et reproductible dans le temps de l'étendue et de l'intensité de la salinité, des méthodes ont été développées utilisant un système d'information géographique et des données satellitaires (Vincent, B. et al. 1996 ; Tabet, D. et al. 1997). Ces méthodes sont très performantes pour détecter les croûtes de sels qui apparaissent au printemps dans les zones où la salinité est liée aux remontées de nappe, et qui ont en général été abandonnées pour la culture. En revanche, dans les zones cultivées où la salinité est faible à moyenne, ou sodique, l'évaluation de l'étendue et de l'intensité du phénomène nécessite de combiner les données de télédétection avec d'autres variables spatialisées comme la nature du sol et des cultures, des indicateurs de gestion de l'eau (apports d'eau, type d'irrigation) ; cette combinaison permet d'identifier les zones faiblement à moyennement salinisées avec une précision proche de 80%.

## **DISCUSSION ET CONCLUSION**

### **Structure spatiale et redistribution des sels à l'échelle des aménagements**

Les exemples présentés nous permettent d'illustrer différents déterminants et processus de répartition des sels dans les périmètres irrigués. Ils illustrent aussi le fait qu'il n'existe pas de principe général qui ne doive être raisonné et adapté à chaque contexte. Ces structures spatiales sont souvent liées à une redistribution de sels entre l'amont et l'aval hydraulique des aménagements, et localement en fonction de la topographie et de la nature des sols.

Les zones aval peuvent d'abord être pénalisées dans la distribution de l'eau d'irrigation en situation de restriction ou de pénurie. De tels phénomènes sont observés au Pakistan ; ils conduisent à un recours accru aux eaux souterraines pour l'irrigation, un transfert de sels d'une nappe de qualité médiocre vers les sols et un risque de dégradation des sols par sodisation. En Chine, les restrictions mises en oeuvre dans la distribution des eaux d'irrigation représentent un nouveau facteur de risque de salinisation à l'aval hydraulique des aménagements, dans la mesure où ces zones seraient plus systématiquement pénalisées. En Chine encore, l'aval du bassin du fleuve jaune est pénalisé mais cela se traduit par une gestion plus efficiente des eaux d'irrigation et de drainage pour le contrôle de la salinité.

La dynamique et la gestion des eaux souterraines sont un déterminant essentiel de la salinité. En l'absence de système de drainage fonctionnel ou en cas d'irrigation excessive, les zones aval sont soumises à l'engorgement et au processus de concentration des sels sous l'influence de l'évaporation (Chine, ou encore Pakistan dans une situation antérieure). A l'inverse lorsque le drainage est efficient, d'importantes quantités de sels peuvent alors être

exportées et contaminer les zones situées en aval (Ouzbékistan, Mali). A l'aval de la vallée du fleuve Jaune (Chine), les eaux de drainage sont recyclées, mélangées à des eaux fraîches et contribuent au contrôle de la salinité par lessivage en situation de pénurie d'eau d'irrigation.

D'autres causes sont susceptibles de déterminer le fonctionnement hydrologique du milieu et la distribution des sels aux plus grandes échelles. C'est notamment le cas de la topographie combinée à la nature des dépôts sableux (levée) ou argileux (cuvettes) dans les milieux alluviaux ou deltaïques (Mali). La situation du Mali reste cependant atypique dans la mesure où les flux d'eau et de sels sont globalement ascendants sous l'influence de la recharge de la nappe et d'un drainage essentiellement superficiel.

Ces évolutions ne sont pas linéaires mais soumises aux aléas et modifications des pratiques dans la gestion des systèmes irrigués. Au Mali, une très nette inflexion a ainsi pu être mise en évidence depuis la réhabilitation des infrastructures d'irrigation et de drainage et la modification des pratiques qui en résultent. Au Pakistan, la salinité des sols semble avoir décru avec la baisse de la nappe tandis que l'utilisation des eaux souterraines s'accompagne d'un risque accru de sodisation des sols. En Ouzbékistan, l'introduction du drainage souterrain a permis une désalinisation importante des sols tout en mettant en péril le système en aval. En Chine, un système millénaire aura sans doute connu plusieurs bouleversements dont le dernier avatar pourrait résulter d'une démarche en cours de réduction des allocations d'eau.

### **Méthode d'étude de la variabilité spatiale et des évolutions temporelles de la salinité**

Les méthodes d'étude de la variabilité spatiale et des évolutions temporelles de la salinité à l'échelle des aménagements sont à la fois diverses et complémentaires. Aucune d'entre elles ne semble en mesure d'appréhender seule la nature des processus en cours au sein de milieux souvent complexes et d'une superficie importante.

La connaissance de la structure spatiale de la salinité est une information primordiale qui permet, dans un contexte donné, de préciser les situations les plus sensibles à la salinisation. L'imagerie satellitaire est alors un outil particulièrement adapté à l'analyse de cette variabilité à petite échelle et à moindre coût. Ses potentialités restent cependant limitées à l'observation des états de surface à certaines périodes singulières de l'année où il est possible mettre en évidence l'apparition d'efflorescences salines, le développement de la végétation ou différents éléments caractéristiques de l'état de surface des sols en relation avec leurs constituants, leur structure ou leur humidité. L'interprétation des images nécessite une connaissance suffisante du milieu, ou encore l'assimilation de données additionnelles sur les sols, les cultures, la gestion de l'eau, ... Sous certaines conditions, de taille de périmètres et d'échelle d'observation notamment, la télédétection peut aussi contribuer à l'élaboration d'indicateurs de performance du système.

La mesure des propriétés des sols : analyse d'échantillons prélevés, mesure in situ de la conductivité électrique par des méthodes électromagnétiques, ... selon un maillage adapté à la structure spatiale des sols et à l'échelle considérée, est en mesure de fournir des informations pertinentes lorsque les superficies abordées sont assez réduites. Mais comme pour la télédétection, la signification des résultats ne peut être véritablement interprétée que dans la mesure où sont acquises simultanément les informations sur les déterminants de cette répartition : situation hydraulique, situation topographique, type de sol, ...

La seconde source d'information concerne la mesure des bilans d'entrée et de sortie des eaux et des sels à différentes échelles pertinentes et accessibles dans les périmètres irrigués. Ils renseignent sur les tendances à l'augmentation ou à la diminution des stocks de sels et fournissent alors un indicateur de risque additionnel indépendant de la répartition spatiale des sels dans le milieu. La mise en place de dispositifs pérennes de suivi de ces bilans est indispensable pour évaluer les tendances évolutives, dans un sens ou dans l'autre, de la salinité. Ces dispositifs peuvent être intégrés dans les systèmes d'évaluation préexistants des performances des réseaux d'irrigation et de drainage, à un coût limité.

L'analyse de ces informations permet alors d'apprécier le risque encouru, et de concevoir des dispositifs de suivi de l'évolution des sols adaptés aux évolutions en cours et aux moyens disponibles. La connaissance des mécanismes (modèle) et la simulation numérique y contribuent en précisant la nature et la vitesse des évolutions pressenties. Une fois établies ces hypothèses, les modalités d'échantillonnage et la fréquence des observations peuvent être optimisées en fonction des résultats attendus et des moyens disponibles ; un effort particulier doit être consenti pour la caractérisation d'un état initial du système. Pour devenir de véritables outils de gestion, l'analyse des pratiques des agriculteurs et des gestionnaires d'aménagement et le suivi de leurs évolutions doivent être menés conjointement et reliés aux évolutions observées.

Ce n'est qu'à ces conditions que de véritables méthodes de gestion et de contrôle de la salinité pourront être conçues et mises en œuvre de façon adaptée à chaque contexte.

## REFERENCES

- Bertrand, R., B. Keita et M. K. N'Diaye 1992. La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées sud-saharienne. Cas de l'Office du Niger au Mali. *Cahiers Agricultures* 2(5): 318-329.
- Bouarfa, S., D. Zimmer, Z. Yang and J. W. Wu. 2003. Assessment of the dual functioning of surface drainage and water-table management in Boijili irrigation district. Water savings in the Yellow River Basin. L. S. Pereira, L. G. Cai, A. Musy and P. S. Minhas. Beijing, China Agriculture Press: pp 211-228.
- Cai, L. G., Z. Mao, S. X. Fang and H. S. Liu. 2003. The Yellow River Basin and case study areas. Water savings in the Yellow River Basin. L. S. Pereira, L. G. Cai, A. Musy and P. S. Minhas. Beijing, China Agriculture Press: pp 9-25.



Condom, N., M. Kuper, S. Marlet, V. Valles and J. W. Kijne. 1999. Salinization, alkalization and sodification in Punjab (Pakistan): characterization of the geochemical and physical processes of degradation. *Land Degradation and Development* 10(2): 123-140.

Dicko, M., S. Marlet, V. Valles, M. K. Ndiaye, C. Chevassus-Rosset and N. Condom. 2002. Influence of biogeochemical mechanisms on soil alkalinity in flooded alkaline soil. 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, 14-20 August 2002, Bangkok, Thailand: Soil and Fertilizer Society of Thailand.

Dukhovny, V., K. Yakubov, A. Usmano, and M. Yakubov. 2002. Drainage water management in the Aral Sea Basin. In: K.K. Tanji and N.C. Kielen, Editors, *Agricultural Drainage Water Management in Arid and Semi-Arid Areas*, FAO Irrigation and Drainage (2002) Paper 61, Rome (1–23 CD ROM Annex).

Ghassemi, F., A. J. Jakeman and H. A. Nix. 1995. Salinisation of land and water resources : human causes, management and case studies., CABI/UNiv. New South Wales Press Ltd.

Gupta, I. C. 2000. Assessment of quality of irrigation waters and industrial effluents discharged on land for irrigation. *Industrial waste waters and environmental pollution*. I. C. Gupta, D. C. Joshi and D. Kumar. Jodhpur, India, Scientific Publishers (India): 131-151.

Hollanders, P. H. J., B. Schultz, S. L. Wang, S. X. Fang, F. X. Li and D. Xu. 2003. Drainage and salinity Assessment for environmental improvement in Huinong irrigation district. Water savings in the Yellow River Basin. L. S. Pereira, Cai, L.G., Musy, A., Minhas, P.S. Beijing, China Agriculture Press: pp 191-210.

ILRI. 1994. *Drainage Principles and Applications*, Ritzema H.P.(ed), Publication 16, second edition, pp 1125.

Kuper, M. and Z. Habib. 2002. Containing salinity through irrigation management : The case of the Fordwah area in Pakistan. Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation, Montpellier, France, 28-29 mai 2002, La librairie du CIRAD.

Mao, Z., B. Dong, S. X. Fang and L. S. Pereira. 2003. Paddy irrigation systems: Assessment and water saving issues. Water savings in the Yellow River Basin. L. S. Pereira, L. G. Cai, A. Musy and P. S. Minhas. Beijing, China Agriculture Press: pp 93-106.

Marlet, S. 1997. Salinization of the irrigated soils in the Punjab (Pakistan). Consultancy Report. P. N. P. IWMI. Lahore, Pakistan.

Marlet, S. 2004. Evolution des systèmes d'irrigation et gestion de la salinité des terres irriguées. Séminaire WADEMED sur la modernisation de l'agriculture irriguée, Rabat du 19 au 21 avril 2004.

Marlet, S. et M. K. N'Diaye. 2002. La fertilité des sols. Des risques d'alcalinisation liés à l'irrigation et aux pratiques de culture. L'office du Niger, grenier a riz du Mali: succes économiques, transitions culturelles et politiques de developpemen. P. Bonneval, M. Kuper and J. P. Tonneau. Montpellier, France, La librairie du CIRAD.

Minhas, P. S., N. K. Tyagi, S. K. Gupta, K. L. Ding, L. G. Cai, D. Xu and L. S. Pereira. 2003. Drainage water re-use options in Boijili irrigation district, Shandong. Water savings in the Yellow River Basin. L. S. Pereira, L. G. Cai, A. Musy and P. S. Minhas. Beijing, China Agriculture Press: pp 229-243.

N'Diaye, M. K., S. Marlet et M. Dicko. 2003. Maîtrise de l'irrigation et du drainage en riziculture irriguée et désalcalinisation des sols à l'Office du Niger (Mali). Vers une

maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation, Montpellier, France, Montpellier, France : Cédérom du CIRAD.

Rhoades, J.D. 1997. Sustainability of irrigation : an overview of salinity problems and control strategies, Riverside, CA, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS.

Tabet, D., A. Vidal, D. Zimmer, S. Asif, M. Aslam, M. Kuper and P. Strosser. 1997. Soils salinity characterization in SPOT images : a case study in one irrigation system of the Punjab, Pakistan. 7<sup>th</sup> International Symposium : Physical measurements and signatures in remote sensing, Courchevel, France, 7-11 april 1997.

Vincent, B. 2003. Remote sensing for spatial analysys of irrigated areas. Water savings in the Yellow River Basin. L. S. Pereira, L. G. Cai, A. Musy and P. S. Minhas. Beijin, China Agriculture Press: pp 29-45.

Vincent, B., A. Vidal, D. Tabet, A. Baqri and M. Kuper. 1996. Use of satellite remote sensing for the assessment of waterlogging or salinity as an indication of the performance of drained systems. 16<sup>th</sup> International Congress on Irrigation and Drainage. Workshop on the evaluation of performance of subsurface drainage systems, Cairo, Egypt, 15-22 September 1996.

Wang, X., P. H. J. Hollanders, S. Wang and S. X. Fang, 2004. "Effect of field ground table control on water and salinity balance and crop yield in Qingtongxia irrigation district, China." Irrigation and Drainage 53(3): pp 263-276.

Zimmer, D. 2003. Introduction. Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation, Montpellier, France, Montpellier, France : Cédérom du CIRAD.